

# 基于蘑菇型结构的双入射超宽带复合媒质材料设计与分析\*

张洪欣<sup>†</sup> 李栅 张金玲 刘雯 吕英华

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

(2011年3月19日收到; 2011年5月19日收到修改稿)

通过设计一定的单元结构, 可以实现超宽带人工电磁材料. 基于蘑菇型金属结构, 提出了一种同时具有左右手通带无缝结合的超宽带双入射型复合媒质材料结构单元. 该结构由嵌入到介质板的两个反向对称的蘑菇型金属结构组成, 能够同时引发电谐振和磁谐振而得到左手通带. 通过利用 CST 软件仿真、等效电磁参数提取、折射率计算以及建立等效磁谐振电路模型等方法, 分析验证了该结构的双入射特性和左手特性. 仿真结果表明, 在电磁波垂直于介质板和平行于介质板入射两种情况下, 在  $X$  波段均表现出左手通带特性, 并具有 1 GHz 以上的左手带宽. 当电磁波垂直于介质板入射时, 在 7.2 GHz—9.3 GHz 频段为右手通带, 在 9.3 GHz—11 GHz 频段为左手通带; 当电磁波平行于介质板入射时, 在 7.0 GHz—9.0 GHz 频段为右手通带, 在 9.0 GHz—10 GHz 频段为左手通带. 在两种情况下分别于 9.3 GHz 与 9.0 GHz 处得到了零折射率, 从而构造了一种正-零-负复合媒质材料, 实现了具有 3 GHz 带宽的双入射超宽带平衡结构.

**关键词:** 蘑菇型结构, 左手材料, 双入射, 平衡结构

**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci, 42.70.Qs

## 1 引言

左手材料的主要思想源于前苏联物理学家 Veselago 在 1968 年提出的同时具有负介电常数和负磁导率材料的概念<sup>[1]</sup>. 当介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  都小于零时, 波矢  $\mathbf{k}$  与能量流方向相反, 因而折射率为负, 得到左手材料的负折射率特性. 由于制作技术的限制, 直到 Pendry 等<sup>[2]</sup> 和 Smith 等<sup>[3]</sup> 分别于 1996 年和 1999 年利用开口谐振环与金属丝组合而成了一种人工结构, 左手材料才得以实现. 其中可以利用金属丝的等离子体效应实现负介电常数, 利用开口谐振环的磁谐振实现负磁导率. 这种结构奠定了左手材料结构设计的理论基础, 同时也引发了对左手材料研究的热潮<sup>[4-7]</sup>. 此后, 人们不断探索和揭示左手材料的各种奇异性质并向应用性发展. 我们研究了左手材料的非线性特性<sup>[8]</sup>, 还利用寄生谐振单元设计了一种可控的左手材料<sup>[9]</sup>. Sulaiman 等<sup>[10]</sup> 研究了左手材料在天线聚

焦方面的应用. 然而传统结构的左手材料构造复杂, 带宽窄, 损耗大, 并且在结构尺寸上也有限制, 因此各种改进的结构不断被提出. 目前, 对左手材料结构的设计有两种方法: 一种是继续保持电磁波平行于介质基板入射时, 实现左手通带特性, 如对称环结构<sup>[11]</sup>、双 S 结构<sup>[12]</sup>、 $\Omega$  结构<sup>[13]</sup>、H 结构<sup>[14]</sup> 等; 另一种是电磁波垂直于介质基板入射时, 实现左手通带特性, 如金属线对结构<sup>[15]</sup>、双工字形结构<sup>[16]</sup>、渔网结构<sup>[17,18]</sup> 等. 具有实际应用价值的左手材料应在三个维度、至少两个方向上具有左手特性, 然而传统的开口谐振环与金属丝结构难以同时在这两种入射的情况下实现左手通带特性. 我们在文献<sup>[19]</sup> 中利用反向对称的 Z 形金属条, 组成左手材料结构单元, 实现了双入射左手特性, 但是得到的带宽比较窄.

为了研究超宽带复合媒质材料的设计, 本文基于蘑菇型金属结构, 提出了一种双入射型人工电磁材料单元, 构造了一种平衡结构, 并获得了超宽带

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60871081, 61072136)、北京市自然科学基金 (批准号: 4112039) 和北京邮电大学大学生创新计划基金 (2010) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: hongxinzhong@bupt.edu.cn

特性. 在电磁波垂直于介质基板入射时, 介质板两侧的蘑菇型单元相互耦合, 形成了磁谐振, 而金属结构本身具有的等离子体效应形成了电谐振; 当电磁波平行于介质基板入射时, 由同一平面的蘑菇型结构构成了左手传输线形式, 导致了负磁导率和负介电常数的产生. 因此, 利用一种结构单元即可实现二维左手特性. 本文利用三维电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对该结构进行了仿真, 通过  $S$  参数研究了它的双入射左手特性, 并结合电磁参数提取方法 [20], 提取了等效介电常数、等效磁导率以及折射率等, 并进一步利用等效电路模型验证和分析了其二维双负通带的存在. 与文献 [16] 的工字形结构相比, 本文仅利用一种结构形式就实现了二维左手特性, 并得到了双入射型超宽带平衡结构复合材料单元; 在双入射的情况下, 与文献 [19] 得到的 250 MHz 及 600 MHz 的左手通带带宽相比, 本文得到了 1.7 GHz 及 1.0 GHz 的左手通带带宽. 利用这种结构单元还可以得到带宽约为 3 GHz 的左右手无缝结合的平衡结构人工电磁材料, 可以视为一种超宽带复合媒质材料.

## 2 蘑菇型结构单元的设计

通过设计一定的单元结构, 使得等效介电常数和等效磁导率同时为负, 就可以实现左手材料. 对于连续金属丝以及类似结构, 都可以在电等离子体频率以下实现负等效介电常数. 而等效负磁导率的实现, 则要求结构单元能够形成磁谐振回路, 并且磁谐振频率要低于电等离子体频率, 才能够实现具有双负左手通带的媒质材料.

本文设计的蘑菇型结构单元如图 1 所示, 介质板两面的结构单元反对称放置. 图 1(a) 为侧视图, 图 1(b) 为俯视图. 其中的中间金属条倾斜放置, 倾角为  $40^\circ$ . 介质板长 10 mm, 宽 6 mm,  $z$  方向上周期为 3 mm, 厚 0.25 mm, 相对介电常数为 9.8. 在图 1(b) 中, 上端与  $x$  方向平行的金属条长 4 mm, 宽 0.5 mm; 下端沿  $x$  方向贯穿基本单元的金属条宽度为 0.1 mm; 两条斜金属条的距离为 5 mm, 宽 0.1 mm, 它们之间沿  $x$  方向的距离为 3 mm; 所有金属条厚度均为 0.017 mm. 显然该结构与 Smith 谐振环相比更简单且易于制作.

下面将仿真并证明该结构电磁波在  $y$  和  $z$  两个方向上入射时具有的左手特性. 设电磁波垂直介质板入射与平行介质板入射时, 电场极化方向都为细长金属条  $x$  方向. 在电磁波垂直于介质基板入射

时, 介质板两侧的蘑菇型金属条相互耦合构成回路, 形成了磁谐振; 而在电磁波平行于介质基板入射时, 由同一平面的蘑菇型结构构成了左手传输线结构形式, 导致了负磁导率和负介电常数的产生. 又由于蘑菇型结构中的金属丝具有等离子体效应, 可以引发电谐振, 因此可以利用一种结构单元即可实现二维左手特性.

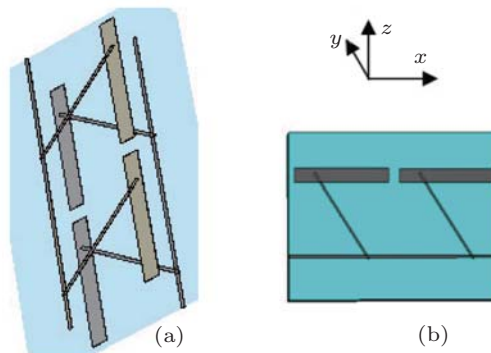


图 1 蘑菇型左手材料结构 (a) 侧视图; (b) 俯视图

### 2.1 电磁波垂直于介质板入射

利用 CST 对蘑菇型结构建模. 设电磁波沿垂直于介质板方向入射, 在结构单元的  $x, y$  方向分别设置周期边界条件,  $z$  方向设置入射端口. 周期边界条件分别设为理想电边界和理想磁边界 [6]. 激励源使用波导端口或平面波, 电磁波沿  $z$  方向入射, 电场极化方向为  $x$  方向. 通过仿真得到的  $S$  参数的幅度分布如图 2(a) 所示, 可以发现在 7.2 GHz—11 GHz 出现通带, 其  $-10$  dB 带宽为 3.8 GHz, 具有超宽带特性. 图 2(b) 为  $S$  参数的相位分布, 在该频段中出现了相位突变, 可以预言左手通带的存在.

可以通过参数提取的方法获得该结构的等效介电常数  $\epsilon$  和等效磁导率  $\mu$ . 通常提取等效介电常数和等效磁导率常用的方法为 Nicolson-Ross-Weir (NRW) 方法 [12–16], 首先引入两个参量  $V_1 = S_{21} + S_{11}$ ,  $V_2 = S_{21} - S_{11}$  然后可以导出

$$X = \frac{1 + V_1 V_2}{V_1 + V_2} = \frac{1 + Z^2}{2Z}, \quad (1)$$

$$Y = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2} = \frac{1 + \Gamma^2}{2\Gamma}, \quad (2)$$

因此可得

$$Z = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, \quad (3)$$

$$\Gamma = Y \pm \sqrt{Y^2 - 1}, \quad (4)$$

其中  $Z$  为波阻抗,  $\Gamma$  为反射系数. (3) 和 (4) 式中正负号的选取由  $|Z| \leq 1, |\Gamma| \leq 1$  决定. 波数可以进一步表示为  $k = \frac{1}{jd} \ln(Z)$ . 当介质板的厚度  $d$  不是太大时,  $kd \leq 1$  (大多数左手材料都成立), 等效介电常数可表示为 [20]

$$\mu_r = \frac{2}{jk_0 d} \frac{1 - V_2}{1 + V_2}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_r = \left(\frac{k}{k_0}\right)^2 \frac{1}{\mu_r}, \quad (6)$$

其中,  $k_0 = \frac{2\pi f}{c}$ . 在获得  $\varepsilon$  和  $\mu$  后, 可以进一步利用关系式  $\mu_r = nZ$ , 或者  $\varepsilon_r = n/Z$  计算出材料的折射率  $n$ .

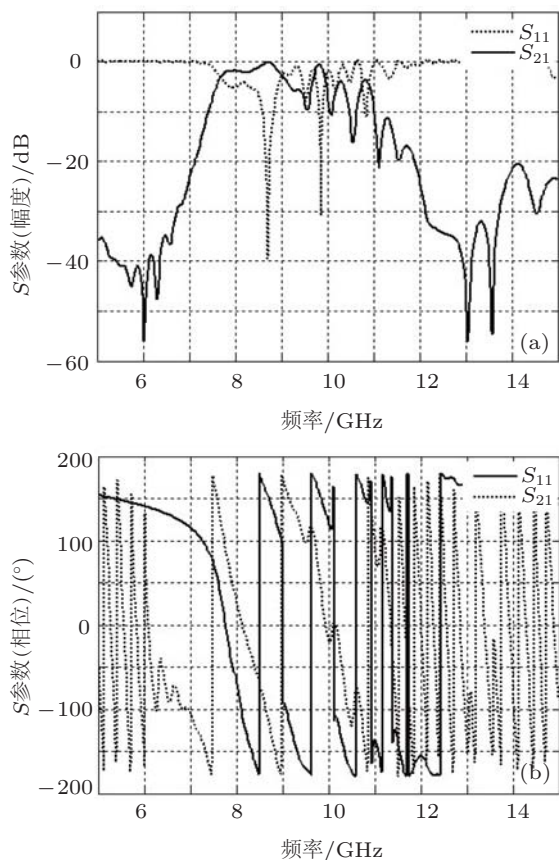


图2 蘑菇型左手材料  $S$  参数 (a)  $S$  参数幅度图; (b)  $S$  参数相位图

图 3(a) 给出了通过  $S$  参数提取的  $\varepsilon$  和  $\mu$  的实部, 可见在与  $S$  参数对应的部分为双负频段, 此时  $\varepsilon$  和  $\mu$  同时为负值. 图 3(b) 给出了折射率  $n$  随频率的变化, 在磁导率和介电常数同时为负的范围内表现为负折射率, 其他地方表现为正折射率. 可见, 对应于图 2 中的通带, 7.2 GHz—9.3 GHz 为右手通带, 在 9.3 GHz—11 GHz 为左手通带. 左手通带的  $-10$  dB 带宽为 1.7 GHz, 远远大于文献 [19] 中 250 MHz 带宽. 这种结构在 9.3 GHz 处出现了零

折射率, 实现了正 - 零 - 负折射率的过渡, 从而得到了右手通带和左手通带无缝结合的超宽带平衡结构, 也同样证明了双负左手通带的存在.

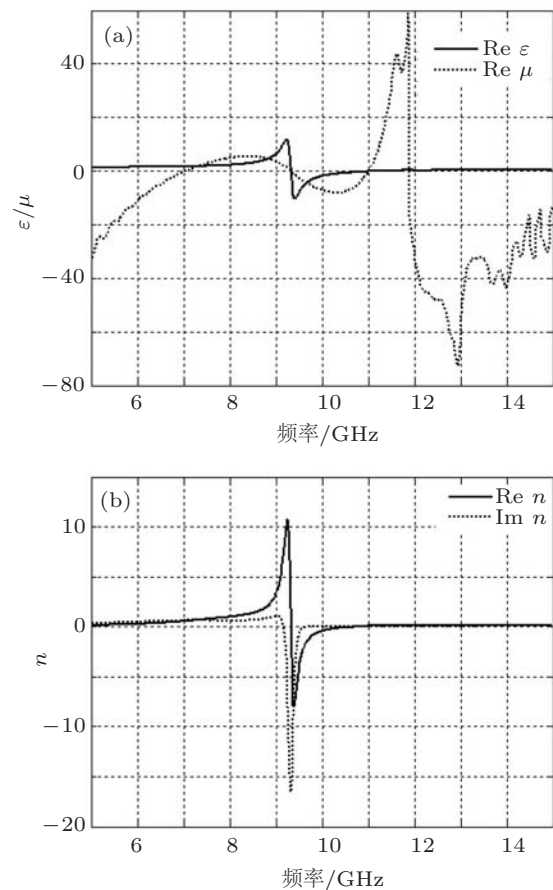


图3 等效介电常数、等效磁导率和折射率 (a)  $\varepsilon$  和  $\mu$  的实部; (b) 折射率

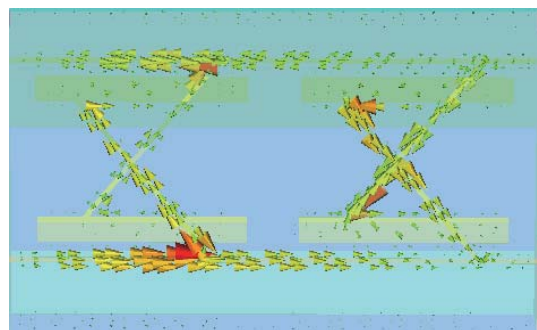


图4 垂直入射时电流分布

在电磁波沿垂直于介质板方向入射的情况下, 利用 CST MWS 的场监视器功能, 可以检测谐振频率下该结构的电流分布如图 4 所示. 可见, 前后平面的蘑菇型结构相互耦合构成了两个电流旋向相同的谐振环路, 并引起负磁导率; 而负介电常数主要由细金属条等离子状态引起. 细金属条产生较大



的电感, 开口处引入较大的电容. 其中一个单元的磁谐振等效电路如图 5 所示.  $C$  为介质板前后两面蘑菇型结构的耦合电容,  $L_1, L_2, C_1$  为前面结构的电感和电容,  $L_3, L_4, C_2$  为后面结构的电感和电容.

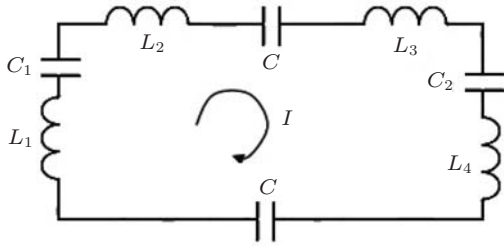


图 5 垂直入射时等效磁谐振电路

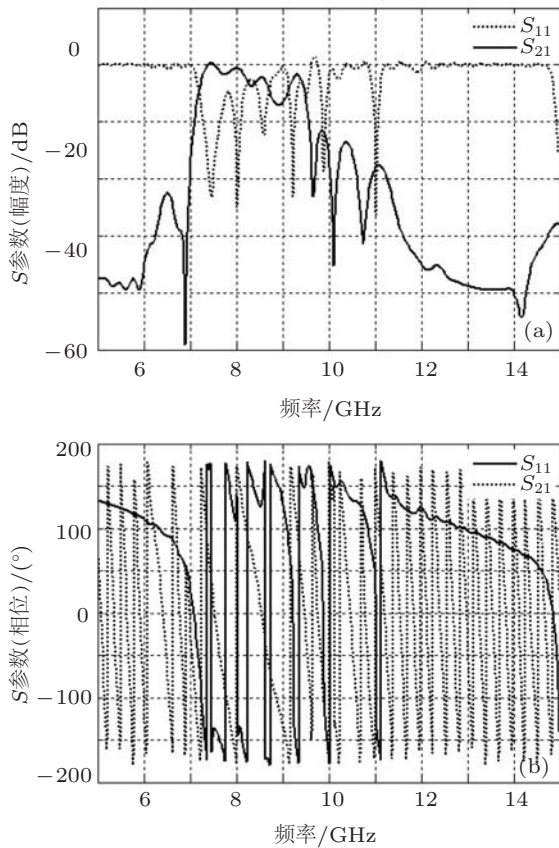


图 6 蘑菇型左手材料  $S$  参数 (a)  $S$  参数幅度图; (b)  $S$  参数相位图

## 2.2 电磁波平行于介质板入射

设电磁波平行于介质板  $y$  方向入射, 电场极化方向仍为  $x$  方向. 在单元结构的  $x, z$  方向分别设为周期边界条件,  $y$  方向设置入射端口. 通过 CST 仿真得到的  $S$  参数的幅度如图 6(a) 所示, 相位分布如图 6(b) 所示. 可以看出, 在频段 7 GHz—10 GHz 出现了通带, 具有超宽带特性. 同样, 在该频段中出现了相位突变, 可以预言左手通带的存在.

电磁波平行入射时提取的等效介电常数与等效磁导率的实部如图 7(a) 所示, 图 7(b) 为相应的折射率曲线. 可见在 7.0 GHz—9.0 GHz 频段  $\epsilon$  和  $\mu$  均为正,  $n$  为正, 为右手通带; 在 9.0 GHz—10 GHz 频段  $\epsilon$  和  $\mu$  均为负值,  $n$  也为负, 表现为左手通带, 左手通带的带宽约为 1.0 GHz, 远大于文献 [19] 中 600 MHz 带宽; 而在 6 GHz—9.5 GHz 频段  $\epsilon$  和  $\mu$  均为正值,  $n$  为正, 表现为右手通带.

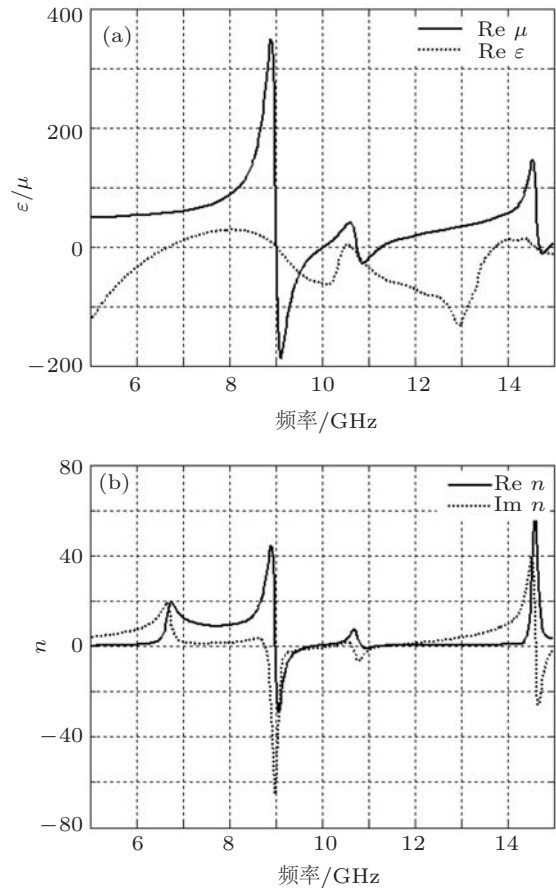


图 7 等效介电常数、等效磁导率和折射率 (a)  $\epsilon$  和  $\mu$  的实部; (b) 折射率

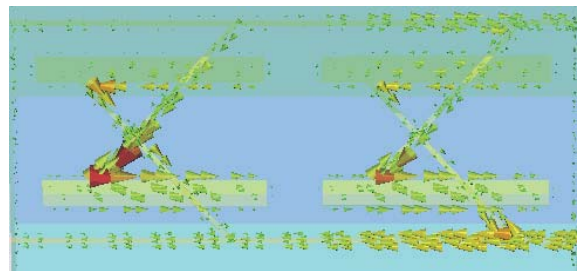


图 8 平行入射时电流分布

同样, 在电磁波平行入射时, 蘑菇型结构在 9.0 GHz 处出现了零折射率, 具有正 - 零 - 负折射率特性, 实现了右手通带和左手通带无缝结合

的超宽带平衡结构,也同时证明了双负左手通带的存在.

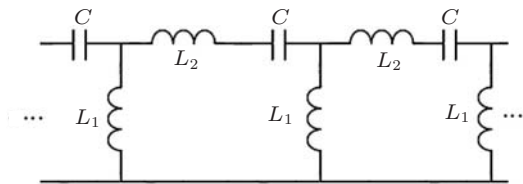


图9 平行入射时等效磁谐振电路

在电磁波平行入射的情况下,电流分布如图8所示.可见,介质板两侧的蘑菇型结构之间的耦合较小,而同一平面的蘑菇型结构构成了左手传输线形式,该等效传输线结构导致了负磁导率和负介电常数的产生.沿 $x$ 方向的金属条结构仍产生电谐振,其中介质板一面的左手传输线等效电路如图9所示. $L_1$ 为斜金属条的等效电感, $L_2$ 为宽边金属条

的等效电感, $C$ 为等效电容.

### 3 结论

利用反对称蘑菇型结构,设计了双入射型二维复合媒质材料单元.通过对该结构单元进行 $S$ 参数仿真、等效电磁参数提取及等效电路分析等,分析和验证了左手材料单元的右手和左手通带特性.仿真实验表明,在电磁波垂直入射和电磁波平行入射时,分别在频段7.2 GHz—11 GHz, 7 GHz—10 GHz得到了具有3 GHz带宽的双入射型超宽带平衡结构,并分别在9.3 GHz和9 GHz处出现了零折射率,构造了一种正-零-负超媒质材料.相比于由金属丝和开口谐振环结构构造的传统左手材料,这种双入射型二维复合媒质材料可以利用一种形式即可实现,具有更优越的电磁波入射适应性和超宽带特性.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [3] Smith D R, Vier D C, Padilla W J 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 1425
- [4] Shi H Y, Jiang Y Y, Sun X D, Guo R H, Zhao Y P 2005 *Chin. Phys.* **14** 1571
- [5] Jiang T, Chen Y, Feng Y J 2006 *Chin. Phys.* **15** 1154
- [6] Zhang H X, Bao Y F, Lu Y H, Chen T M, Wang H X 2008 *Chin. Phys. B* **17** 164
- [7] Zhuo S C, Yan C C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 360 (in Chinese) [卓士创, 闫长春 2010 物理学报 **59** 360]
- [8] Zang H X, Zhao L, Lu Y H 2009 *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* **18** 441
- [9] Zang H X, Zhao L, Lu Y H 2010 *Chin. J. Phys.* **48** 103
- [10] Sulaiman A A, Nasaruddin A S, Jusoh M 2010 *Eur. J. Sci. Res.* **44** 493
- [11] Grzegorzczak T M, Moss C D, Lu Jie, Chen X D, Pacheco Jr J, Kong J A 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2956
- [12] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [13] Ran L, Huangfu J, Chen H, Li Y, Zhang X, Chen K, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 073102
- [14] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [15] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [16] Zhang S, Qu S B, Ma H, Xie F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [张松, 屈绍波, 马华, 谢峰, 徐卓 2009 物理学报 **58** 3961]
- [17] Mary A, Rodrigo S G, Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 103902
- [18] Menzel C, Paul T, Rockstuhl C, Pertsch T, Tretyakov S, Lederer F 2010 *Phys. Rev. B* **81** 035320
- [19] Wang H X, Lü Y H, Zhang H X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034101 (in Chinese) [王海侠, 吕英华, 张洪欣 2011 物理学报 **60** 034101]
- [20] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Ante. Prop.* **51** 1516

# Design and analysis of double incidence metamaterials composed of mushroom-shaped structure\*

Zhang Hong-Xin<sup>†</sup> Li Shan Zhang Jin-Ling Liu Wen Lü Ying-Hua

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 19 March 2011; revised manuscript received 19 May 2011)

## Abstract

An ultra-wide band metamaterial may be achieved via the design of some structures. A metamaterial unit supporting two-dimensional (2D) incident electromagnetic (EM) wave is proposed based on the mushroom type-structures, which has an ultra-wide band with seamlessly combined band of right-handed and left-handed pass-bands. This unit is designed by setting two reverse symmetrical mushroom-shaped strips on each side of the dielectric substrate respectively, and the electric resonance and the magnetic resonance could be excited simultaneously. With CST software, the right-handed and left-handed properties are analyzed and verified by means of spectrum analysis, effective parameters of permittivity, permeability and index of refraction extracted from  $S$  parameters, and equivalent magnetic resonance circuits. The results show that the structure can present left-handed properties with 1 GHz left-handed pass-band in  $X$  waveband, either EM wave is incident in the direction perpendicular or parallel to the plane of the substrate. When the EM wave is incident in the direction perpendicular to the substrate, the right-handed and the left-handed pass-bands appear at 7.2 GHz—9.3 GHz and 9.3 GHz—11 GHz respectively; while when the EM wave is incident in the direction parallel to the substrate, the right-handed and the left-handed pass-bands appear at 7.0 GHz—9.0 GHz and 9.0 GHz—10 GHz respectively. It also shows that the zero indexes of refraction occur at 9.3 GHz and 9.0 GHz in the tow instances above. So that a plus-zero-negative metamaterial is constructed and a 2D incident balanced-structure with an ultra-wide band of 3 GHz is achieved.

**Keywords:** mushroom-shaped structure, left-handed material, two-dimensional incidence, balanced-structure

**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci, 42.70.Qs

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871081, 61072136), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4112039) and Research Innovation Fund for College Students of Beijing University of Posts and Telecommunications (2010).

<sup>†</sup> E-mail: hongxinzhang@bupt.edu.cn